

关于测定光学系统的偏心问题

1. 前 言

众所周知,在光学系统的制作误差中,最难办的就是系统的偏心误差了。光学系统的偏心问题,绝不是只靠追求单片透镜的精度就可以解决的。这是因为安装透镜的镜筒加工好坏,以及将单片透镜装配到镜筒里的过程中,操作者的细致程度等等,都给最终的精度带来很大影响。一方面,存在偏心的光学系统中,一般说都产生偏心所特有的非对称性像差,通过这种现象可以确定偏心的存在。但是,只要查不清楚究竟是光学系统的那个部位如何偏心,就无法进行有效的处置。

因此,要想解决光学系统的偏心问题,首先就得要解决装配完毕后的光学系统的偏心测定问题。日本光学工业技术研究协会(JOERA)是在1967年度的镜头测定仪器委员会上,初次把偏心问题做为一项议题提出来^[1]。当时已经知道测定方法有使被测镜头转动进行测定的旋转法和静止不动进行测定的静止法,这两种测定方法各有优缺点。在镜头测定仪器研究委员会中提出这个问题时,还是学术性质的。这次讨论,成为后来研究这个问题的基础。此后,在1972年度,制定了关于偏心问题的研究计划,研究的题目之一,就是为了确定东德蔡司公司采用的静止法的实用性而进行实验分析^[2]。结果表明,东德蔡司公司的静止测定法的优点是适用于变焦距镜头等具有移动组元的光学系统,缺点是从其构造上看出光能损耗大。根据该计划中探讨的结果,得出结论:蔡司公司静止法的光能损耗是一个致命的缺点,只要没有一个彻底的改进方案,就难于实用

化。但是尽管有这样的困难,在各企业之间,还是强烈希望能使东德蔡司公司静止型偏心测定仪实用化。

在此前后,卡依公司也设想,使被镜头不动,而利用转像器的机能,来进行具有旋转法优点的偏心测定^[3]。但是,由于一部份机构的精度要求严格,这种设想一直停留在基础探讨阶段。我们向JOERA提议进行基于这种设想的测定仪的研制,后被采纳作为一般研究课题,开始了第二次关于镜头偏心研究计划。新方式测定装置的制作,比较顺利,基础探讨业已完成,目前正在各厂家试用。下面讲一下这种新研制出来的偏心测定装置的特长,精度以及还存在的问题,并适当地同以前的各种方式做一下比较。这方面的详细情况请参考技术资料^[4]。

2. 光学系统的偏心测定方法综述

1) 偏心测定的基本原理

测定光学系统每个面的偏心,一般都采用利用被测面反射的自准方法。如图1所示,在组成光学系统的若干个面(1,2,3…… ν 面)中,通过平行光管把指标投影在准备测定的表面,例如是投影第 ν 面的曲率中心位置上,考察指标像的偏移情况。对于测定基准轴,如果所有面都不偏心,指标反射像仍回到基准轴上,如果某一个面偏心,反射像便横向移动 Δy (或 Δz)。这个偏移量与各个面的偏心量成正比。如果用平面的倾角表示各个面的偏心量,设为 $(\varepsilon_{y1}, \varepsilon_{z1}), (\varepsilon_{y2}, \varepsilon_{z2}) \dots (\varepsilon_{y\nu}, \varepsilon_{z\nu})$,那么在上述的偏移量 $(\Delta y, \Delta z)$ 和这些偏心量之间,存在以下的

关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = a_1 \begin{bmatrix} \varepsilon_{y1} \\ \varepsilon_{z1} \end{bmatrix} + a_2 \begin{bmatrix} \varepsilon_{y2} \\ \varepsilon_{z2} \end{bmatrix} + \dots + a_r \begin{bmatrix} \varepsilon_{yr} \\ \varepsilon_{zr} \end{bmatrix}$$

在这个式子里, a_1, a_2, \dots, a_r 是可以根据光学系统的数据预先计算出来的常数。假设到 $(v-1)$ 个面的偏心量 $(\varepsilon_{y1}, \varepsilon_{z1}), (\varepsilon_{y2}, \varepsilon_{z2}) \dots (\varepsilon_{yv-1}, \varepsilon_{zv-1})$ 已经求出, 通过测定 $(\Delta y, \Delta z)$, 就可以求出 $(\varepsilon_{yv}, \varepsilon_{zv})$ 。从第一个面开始, 反复地进行这样的测量, 就可以求出全部被测平面的偏心量。在实际的情况下, 对于全部测定面, 集中地测定 $(\Delta y, \Delta z)$ 把测定结果送入计算机, 集中算出所有各个面的偏心量。

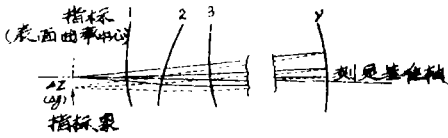


图1 偏心测定的原理

将这个原理具体化时, 最重要的是, 在所有面的测定中, 基准轴一定要保持不变。各个表面的表面曲率中心位置一般都不一样, 而且分布范围很广, 因此要把指标投影在这样不同的位置上, 并且要很精确地投影到基准轴上, 是件很不容易的事情。解决这个难点的方法有旋转法和静止法。

2) 旋转法

这种方法, 尽管测定仪器本身比较简单, 但能够得到很高的精度。整个测定过程就是让装卡被测镜头的夹持部份, 绕仪器中心轴的周围旋转, 把这个旋转轴作为测定基准轴, 只要不把被测镜头从夹持部份移开, 测定基准轴就能够自动保持稳定。在测定过程中, 即使移动了测定仪器, 也没有什么影响。因此, 用这种方法虽然仪器很简单, 却能得到很高的精度。测定方法的概要如图2所示。

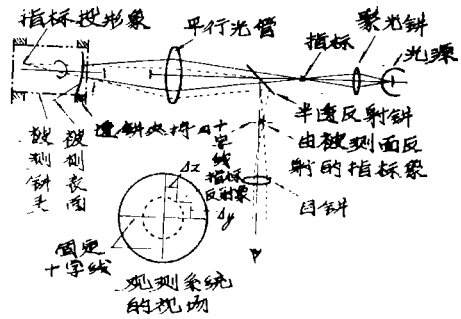


图2 旋转法的偏心测定

进行测定的时候, 首先一边使被测镜头绕旋转轴转动, 一边观察目镜。这样就可以看到指标的像在视场中画圆。圆的中心就是旋转轴的中心位置, 即测定基准轴的位置。所以, 先使十字线的原点与这个圆的中心重合, 然后再把被测镜头放在固定的位置, 这时根据指标像对于十字线原点的偏移, 来读出 $\Delta y, \Delta z$ 。用这种方法, 测定精度可达 $5''$ 左右。但是, 被测镜头是变焦距镜头那样内部含有可动部份时, 就不适用了, 这是这种方法的缺点。

3) 静止法 (东德蔡司试行的方法)

这种方法是把被测镜头固定, 特别是在投影指标的平行光管方面做了改进, 具有焦距改变而光轴完全不发生变化的优点。其结构如图3所示。

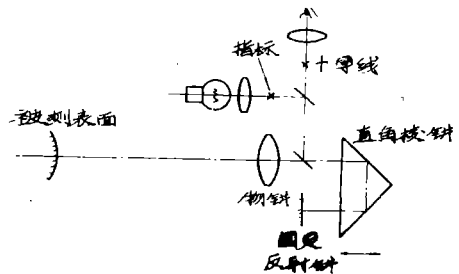


图3 静止法 (东德蔡司公司的方法)

调整焦距靠直角棱镜沿光轴方向的移动来进行。因机械的原因而引起的横移和倾斜, 可以用固定反射镜使光路多次通过直角棱镜, 由直角棱镜本身的性质来抵消, 使光轴保持不变。测量是在被测镜头和测定仪的

相互位置保持恒定的情况下进行，根据测定指标像对于目镜视场中的十字线原点有多大偏移来求出 Δy 和 Δz 。用这种方法进行的测定，由于测定光束要 6 次通过半反射镜，所以光能量损失很大。

4) 静止法 (目前试行的方法)

这种方法的长处就是被测镜头静止不动，而是转象器旋转，进行具有转动法优点的偏心测定。这时，转象器的旋转轴就成了测定基准轴。转象器是由图 4 那样的 3 个有反射面的棱镜组成。要预先做好调整，使沿旋转轴入射的光线再精确地沿着同一旋转轴出射。这种方法的最基本的结构如图 5，就是在图 2 所示的惯常的转动法中，在平行光管和被测镜头之间放上转象器。与旋转法不同的是，要预先进行调整，使得投影指标和观测目镜的十字线原点相对于半反射镜共轭。

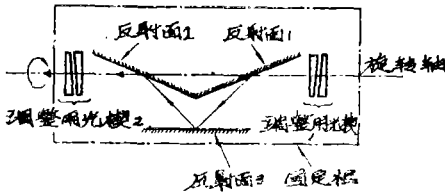


图 4 转象器

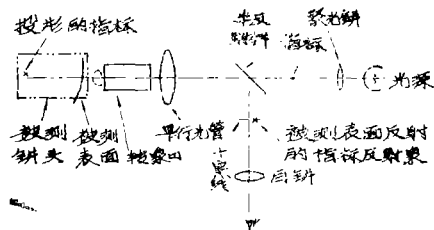


图 5 使用转象器的偏心测定法基本配置

在按照上面所说调整过的装置中，如果用平行光管把指标投影在被测表面曲率中心位置上，在观测视场中就将看到被测表面造成的同样大小的自准反射象。在这里，一使转象器旋转，反射象就将画圆。该圆的中心表示转象器的旋转轴，即为这种方法中的测定基准轴的位置。如果这个圆的中心和目镜

视场内的十字线原点不一致，可以上下左右稍微调整一下平行光管，使其一致。靠这种调整，就可以保证十字线的原点以及投影指标保持在与转象器旋转轴重合的光路上。这样，反射象的偏移量 (Δy 、 Δz) 就以十字线的原点为基准来读出。各个面都这样做，就可以做到以转象器的旋转轴为基准的测定了。

图 6 的装置，便是这种方法的另一种变形。实际上，目前试制的装置就是这种形式。在图 5 的装置中，由于在被测镜头和测定光学系统之间放入转象器，所以在杂光、幻象或者测定光学系统的 $N \cdot \Lambda$ 等方面都有要求。为了解决这个问题，用半反射镜 (实际上是利用平行平面玻璃的表面反射) 把设定基准轴光学系统从测定光学系统中分离出去，像图 6 那样配置。不过，在这种情况下，仍需要经过事先调整，使得测定光学系统内的投影指标和目标视场中的十字线的原点同样相对于半透镜完全共轭。实际测定的时候，首先点亮测定光学系统的光源，移动平行光管进行调焦，使被测表面形成的指标反射像成在目镜的十字线的原点位置上。然后关闭测定用光学系统的光源，移动设定基准轴光学系统的平行光管，使其指标像成在目镜的十字线上。接着，使转象器旋转，指标的像便画成一个圆。这时上下左右稍微调整一下光学系统的平行光管，使圆的中心与目镜的十字线的原点重合。这样就可以保证放入平行光管后，再投影测定光学系统指标时，投影指标能在转象器的旋转轴上。再把光源切换到测定用光学系统中，以十字线的原点为基准，读出这时所看到的被测表面反射回来的指标像的偏移 (Δy 、 Δz)，依次对被测镜头的各个面进行测定即可。如采用这种方法，完全可以同旋转法一样，清楚地观察到被测表面形成的反射象，而且，由于被测镜头固定在一定的位置上，因此，也适用于像变焦距镜头那样内部有可动部份的光学系统。

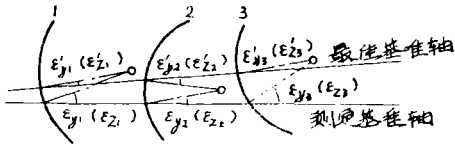


图9 基准轴的变换

5. 精度分析的实验及其结果

这种装置安装调整全部完成之后，进行了确定这种装置精度的测定实验。用JOERA的标准镜头No.3（天赛型 $f = 50$ 毫米1:2.8）作为样品镜头，其距离刻标在无限远位置

上，从正反两个方向反复进行了测定。最初是采用FD200毫米和闭合镜头的组合做为测定光学系统的平行光管。由于像差的影响，得不到足够的精度，所以在中途改换成Nikon的700毫米自准直物镜和JOERA 650毫米平行光管的组合进行测量。图10是表示出从正方向测定4次，从反方向测定3次的测定结果，各个面的偏心量，都是对于最佳基准轴的值。根据图10的表从正方向得到的测定值和从反方向得到的测定值，对于y方向（上下方向）正好有相反的关系。根据这个规律比较一下各个测定值，就可以对测定值的误差和可靠性做出判断。

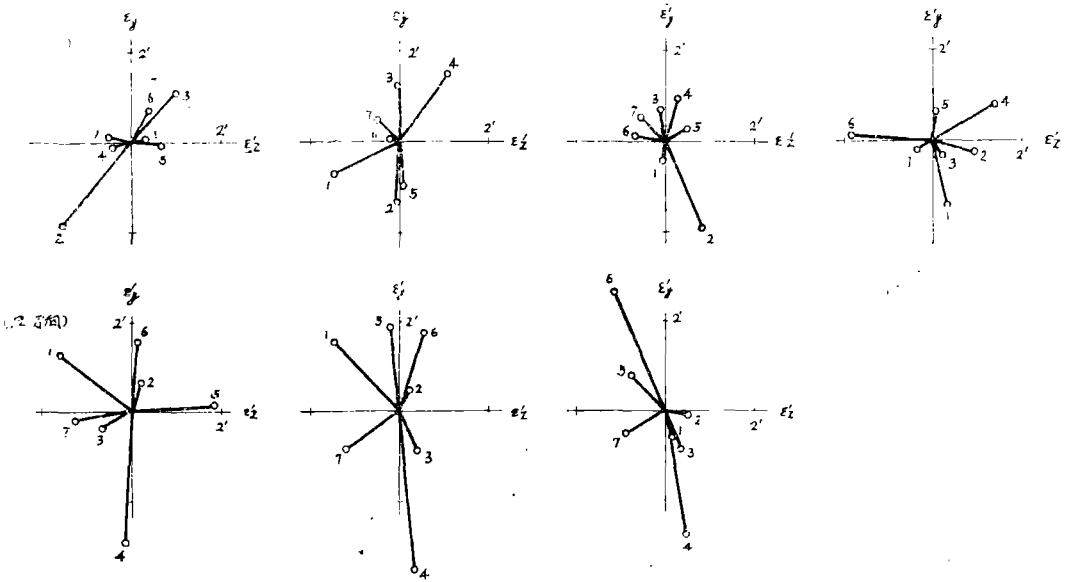


图10 用现今装置的测定结果

（测定光学系统的平行光管是使用Nikon700毫米自准直物镜和JOERA650毫米平行光管的组合。）

为了便于参考，把在相同条件下，用旋转法对同一样面所做的测定结果表示在图11中。

比较一下这两个结果之后可以看出，旋转法方面各个测定值之间的对应是显而易见的，而目前试制的这种装置，这种对应关系勉强才可以看得出来，显然测定精度不如旋转法。

因此，为了再进一步掌握目前试制的这

种装置的测定精度，将在图10中表示的各个测定值和图11中表示的各个测定值一一对应，求出各个面的标准偏差和平均值（这时，从反方向得到的测定值要把y方向的符号变号，再进行计算）。图12中表示出其结果。为便于参考，在这个图上，同时表示了使用FD200毫米和闭合透镜的组合作为测定光学系统平行光管时得到的测定值。

根据图12可以指出以下几点。即，在目

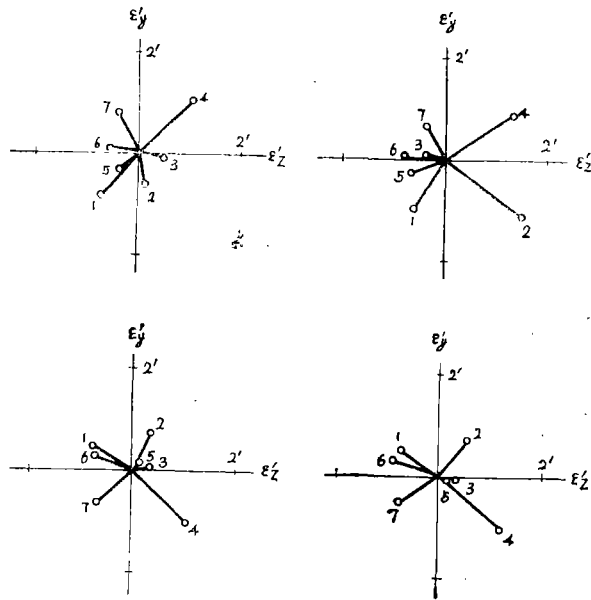
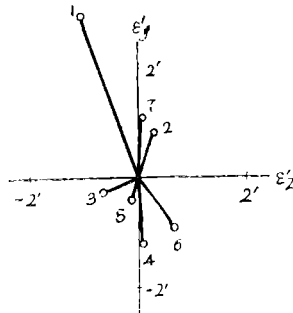


图11 旋转法的测定结果

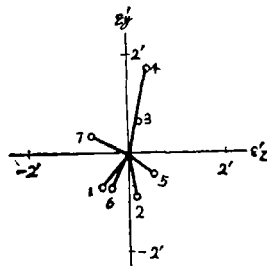
(A) 目前试制的装置 (FD
200毫米1:4和闭合镜头)



标准偏差

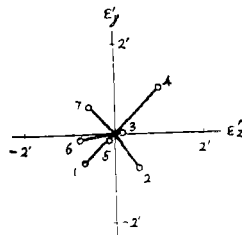
面数	标准偏差
第1面	3.11'
2	1.30'
3	1.01'
4	2.12'
5	2.28'
6	1.22'
7	1.24'

(B) 目前试制的装置 (使用
Nikon自准直物镜 (f = 700
毫米) 和 JOERA 650 毫米
平行光管)



面数	标准偏差
第1面	1.07'
2	1.03'
3	0.64'
4	1.40'
5	0.99'
6	1.42'
7	0.46'

旋转法



面数	标准偏差
第1面	0.23'
2	0.54'
3	0.27'
4	0.12'
5	0.27'
6	0.22'
7	0.21'

图12 各种方法的测定结果的平均值和标准偏差

前试制的装置中，在使用 FD 200 毫米和闭合镜头的组合这种像差较大的镜头做为测定光学系统的平行光管的情况下，即使取多次测定的平均值，也完全不会同旋转法的测定值对应。如将此换成像差小的平行光管，取多次测定的平均值，就可以得到同旋转法的测定值很好对应的结果。这个情况证明了目前这种测定方法在原理上是正确的。精度上还需要探讨。另外，从图12右边表示的各个面的测定值的标准偏差里，可以大致地看出，目前这种装置的精度，才达到旋转法的三分之一。像目前这种装置那样不转动被测镜头来测定偏心的方式，其结构与旋转法相比，必定要复杂，要求达到相同的精度是没有道理的，不过还有充分提高精度的余地。关于几种改善精度的方法，已经在小组讨论会中提出过了。在蔡司方式中还成为问题的反射像亮度，在这种方式中与旋转法相同，胶合面的测定也变得容易了，也可以适用于像变焦距镜头那样的面很多的镜头。在上述试验中，因为选了偏心较小的镜头做为样品镜头，才使得这种装置的精度不够。但是，对

于偏心较大的镜头的分析，这种装置还是能发挥相当的作用的。

参 考 文 献

- 1) JOERA 技术资料 Vol. 5 No. 14 (1968) III 偏心测定。
- 2) JOERA 技术资料 Vol. 10 No. 5 (1973) 2. 关于 Zeiss 方式的镜头偏心测定装置的实验研究。
- 3) 日本特许公开公报 昭43—3936. (松居, 佐藤, 饭岛)
- 4) JOERA 技术资料 Vol. 12 No. 2 (1975) 关于光学系统测定方法的研究 I
- 5) A. L. Ingalls & K. pestrecov; J. Opt. Soc. Amer. 38(1948)343—349.
- 6) 第13届应用物理学关系联合讲演会予稿集 3 (1966)174.
- 7) K. Schuch: Optik 16 (1959) 652—659.

译自“光学技术 コンタクト”

Vol. 13, No. 11, 1975, p11

(马元龙译 刘瑞祥校)